

文章编号:1005-0523(2016)06-0031-07

基于心率变化指标的高原公路平曲线试验研究

竺灵杰¹, 柳本民¹, 郭忠印¹, 刘建蓓²

(1. 同济大学交通运输工程学院, 上海 201804; 2. 中交第一公路勘察设计研究院有限公司, 陕西 西安 710075)

摘要:为提高高原公路行车安全,借助动态GPS、多导电生理记录仪等检测设备,对109国道青藏段海拔3 567~4 709 m区间内公路路线形、行车速度和驾驶人心理反应进行实地检测。以心率增长率为评价指标,确定海拔高度、平曲线半径和车速为影响因素,利用多元回归分析的方法分别建立适用于海拔3 567~3 957 m和4 100~4 709 m的心率变化模型并进行模型检验,最后应用模型结合《公路路线设计规范》(JTG D20-2006)提出不同海拔区间内平曲线半径最小参考值。结果表明:模型精度良好,能够反映驾驶员实际运行过程中的心率增长率变化;海拔3 567~3 957 m区间内平曲线半径应不小于300 m,海拔4 100~4 709 m区间内平曲线半径应不小于350 m为宜。

关键词:交通安全;高原公路;平曲线路段;心率增长率;多元回归分析

中图分类号:U491

文献标志码:A

DOI:10.16749/j.cnki.jecjtu.2016.06.004

由于高原地区低压缺氧的环境特点,同时公路在设计过程中受复杂地形限制存在大量小半径曲线,导致驾驶人在高原公路上行驶时产生的紧张程度以及生理上的负荷均大于平原公路^[1],而目前采用的中国规范^[2]规定海拔3 000 m以上高原公路纵坡必须根据海拔高度不同进行折减,对平曲线半径并没有明确的规定,在实际公路设计过程中仍以平原公路设计规范为准;因此本文从驾驶人心率变化指标入手,分析寻求适用于高原公路的平曲线半径最小参考值,为今后高原公路设计改造提供技术支撑。

本文中高原地区特指海拔大于3 000 m的高原,因为在这个高度上可使大多数人在静息状态下出现不同程度的高原反应,而超过这个高度,其生理和心理方面的改变明显加剧^[3],因而对行车安全的影响也开始显现。

近年来,已有不少学者从驾驶人角度对高原公路安全性进行了研究,如北京工业大学的乔建刚^[4]以心率增长率和血氧含量为指标研究高原公路纵坡折减问题,将现行规范中制定的海拔3 000 m以上每升高1 000 m纵坡折减1%修正为每升高500 m纵坡折减0.5%,但在试验数据分析过程中缺少模型计算,仅依据对图表进行定性观察得出结论,精确度难以保证。新疆农业大学夏可、刘洋和李岩岩等人^[5-7]研究了高原环境下,驾驶人心率增长率与不同道路线形之间的关系,通过实车试验采集到的数据建立了高原环境下驾驶人心率变化指标和道路线形之间关系模型,并提出相应的线形指标参数,但都只考虑一种或两种心率增长率的影响因素,而实际在高海拔地区公路上行驶中,驾驶人受到车、路和环境三方面因素共同影响,因而得到的模型与实际情况差异较大,而且利用在平原地区得到的驾驶人心率增长率阈值^[8-9]对高原情况下的模型进行套用,得到对应的线形指标参数缺乏可靠性。针对上述不足,笔者以驾驶人心率增长率为评价指标,综合考虑车、路、环境三方面因素,建立高原公路平曲线路段驾驶人速率变化模型,并应用该模型得到符合人性化的高原地区平曲线设计指标参数,为改善高原行车环境提供依据。

收稿日期:2016-05-17

基金项目:“十二五”国家科技支撑计划项目(2014BAG05B00)

作者简介:竺灵杰(1988—),男,硕士研究生,研究方向为道路工程。

通讯作者:柳本民(1968—),女,副教授,博士,研究方向为道路安全。

1 数据采集及预处理

1.1 试验设计

试验路段选取国道 109 K2828-K2896, 路线起点纳赤台(海拔约 3 540 m), 途经西大滩(海拔约 4 150 m), 终点昆仑山口(海拔约 4 710 m), 试验路段设计车速 60 km·h⁻¹, 试验车型为丰田 RAV4 微型多功能越野车。

试验设备采用天宝 Trimble SPS351 信标机, 水平精度小于 1 m, 垂直精度小于 5 m, 用于采集试验车辆的三轴坐标及实时车速; 美国 Biopac 公司生产的 MP150 型 16 通道多导电生理记录仪, 采样率 400 kHz, 采集被试者驾驶过程中的心率数据。试验前将两台设备内置时间进行同步以方便后续数据筛选。

为了研究高原环境对驾驶人心率影响, 试验人员选择进入高原 10 日内的男性司机 13 名, 先在西宁市(海拔约 2 295 m)室内采集被试者平静状态下 15 min 内心率数据, 之后将被试者送至试验地点进行试验, 采集在自由驾驶时的心率指标以及试验车辆实时位置与速度。

1.2 试验数据预处理

根据被试者最终试验完成情况并尽可能反映高原环境下驾驶人行车状态, 从 13 名被试者试验数据中筛选 10 名具有代表性的被试者试验数据作为研究对象, 筛选因素包括试验完成度、年龄、驾龄、居住地平均海拔高度和健康状况, 被试者详细信息见表 1。

表 1 驾驶人基本信息表
Tab.1 Basic information of drivers

被试者编号	性别	年龄	驾龄	居住地及平均海拔/m	有无心血管病史
1	男	37	7	甘肃张掖 1 481	无
2	男	41	9	河南林州 350	无
3	男	38	8	陕西宝鸡 618	无
4	男	45	10	河北承德 350	无
5	男	29	5	河北唐山 21.5	无
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

利用动态 GPS 和多导电生理记录仪自带的数据处理软件, 将采集到的试验数据分别导出, 得到对应时间点试验车辆所在桩号位置、海拔高度、实时车速、被试者单位 PR 周期内心率数据。提取试验路段中平曲线半径小于等于 1 000 m, 坡度小于等于 3% 的路段作为平曲线路段^[10], 以曲中点海拔、被试者通过曲中点时心率增长率和车速作为样本点 1; 平曲线半径大于 1 000 m, 坡度小于等于 3% 的路段为直线段, 以直线段中点海拔、被试者在直线段行驶时的平均心率增长率和平均车速作为样本点 2, 用于单因素影响分析。不同被试者样本数据取平均值用于后续分析, 心率增长率根据式(1)进行计算, 最终数据汇总得到表 2 和表 3。

$$N = \frac{n' - n}{n} \times 100\% \quad (1)$$

式中: N 为驾驶人在行车过程中单位 PR 周期内心率增长率;

n' 为驾驶人在行车过程中单位 PR 周期内平均心率;

n 为驾驶人静态时平均心率。

表 2 平曲线路段上样本数据
Tab.2 Sample data at horizontal curve sections

里程桩号	平曲线半径 R/m	心率增长率 $N/\%$	海拔 M/m	车速 $V/(km \cdot h^{-1})$
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
K2848+187.16	300	20.93	3 762.86	64.01
K2848+820.66	150	20.84	3 788.85	49.21
K2856+046.63	600	20.10	3 957.56	79.38
K2862+755.64	300	32.26	4 100.28	60.34
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

表 3 直线路段上样本数据
Tab.3 Sample data at straight sections

里程桩号	心率增长率 $N/\%$	海拔 M/m	车速 $V/(km \cdot h^{-1})$
⋮	⋮	⋮	⋮
K2847+067.12	18.23	3 591.34	71.21
K2849+233.83	20.56	3 856.57	68.49
K2857+190.23	21.34	4 042.12	78.31
K2864+798.01	26.74	4 213.78	59.72
⋮	⋮	⋮	⋮

2 驾驶人心率变化特性与各影响因素关系

2.1 驾驶人心率增长率与海拔高度关系

海拔高度对驾驶人心率增长率的影响混合了多种影响因素,为了排除道路线形和车速的影响,选取被试者在海拔 3 567~4 709 m 区间内的直线上行驶时,平均车速处于 55~60 $km \cdot h^{-1}$ 的平均心率增长率,如图 1 所示。随着海拔的升高被试者的心率增长率显著增大,变化幅度为 17.20%~34.78%,涨幅 102%;利用 SPSS 软件曲线估计功能建立心率增长率与海拔关系模型,如式(2)。

$$N=3 \times 10^{-10} M^{3.0067} \quad R^2=0.9476 \quad (2)$$

式中: N 为与平曲线路段海拔相关的驾驶人心率增长率,%; M 为平曲线路段海拔高度,m;拟合优度为 0.947 6,显著性水平 P 值小于 0.05,模型显著相关。

同时,通过计算式(2)曲线上各点曲率值,得到海拔 4 050 m 对应点为曲率最大值,即海拔 3 567~4 050 m 区间内,在海拔攀升的同时驾驶人心率变化率逐渐增长,增长幅度缓慢,海拔 4 050 m 之后,增长幅度开始加快,驾驶人紧张程度迅速加剧,造成交通事故的安全隐患增大。

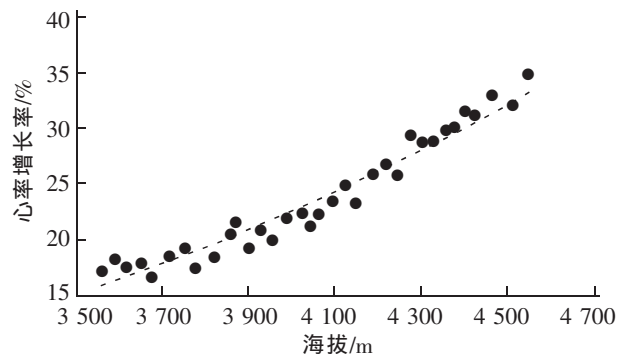


图 1 海拔 3 567~4 709 m 心率增长率与海拔关系
Fig.1 Relationship between heart rate growth and the altitude ranging from 3 567~4 709 m

2.2 驾驶人心率增长与高原公路平曲线半径关系

驾驶人心率增长与平曲线半径的关系如图2所示,在海拔3567~4709 m处平曲线半径半径和心率增长的关系图呈现出两条呈下降趋势的曲线,通过对照平曲线参数表得到上方曲线由海拔高度为4100~4709 m采集到的样本点构成,下方曲线由海拔3567~3957 m采集到的样本点构成。在两个区间内,驾驶人心率增长均随平曲线半径增大而减小,但不同海拔高度区间内心率增长随半径的变化幅度不同,说明在高原区驾驶人的心率增长变化除了受到平曲线半径的影响还受到海拔高度的影响。通过计算两段曲线纵坐标差值得到,在平曲线半径相等或相近路段,驾驶人在海拔4100~4709 m时的心率增长要比海拔3567~3957 m平均高7.28%,这与高原医学^[38]中将海拔4000 m以下为轻度缺氧环境,海拔4000 m以上为重度缺氧环境相符。

利用SPSS软件曲线估计功能建立心率增长与平曲线半径关系模型,如式(3)~式(4)

$$N=0.2851R^{-0.066} \quad M \in [3567, 3957] \quad R^2=0.4807 \quad (3)$$

$$N=0.4479R^{-0.057} \quad M \in [4100, 4709] \quad R^2=0.6725 \quad (4)$$

式中: R 为平曲线半径,m;式(3)~式(4)拟合优度分别为0.4807和0.6725,显著性水平 P 值均小于0.05,模型显著相关。

2.3 驾驶人心率增长与高原公路行车速度关系

同样为了排除海拔及线形对驾驶人心率增长的影响,在对驾驶人心率增长与车速关系分析时选取了海拔区间3700~3800 m内平直路段上的样本数据。如图3所示,在海拔变化平缓的平直路段上,驾驶人心率增长随车速增大,从16.35%增大至22.68%,涨幅为39%。

通过SPSS软件曲线估计功能建立心率增长与行车速度关系模型,如式(5),

$$N=3.3901V^{0.4188} \quad R^2=0.4807 \quad (5)$$

式中: V 为行车速度, $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$;式(5)拟合优度为0.8918,显著性水平 P 值均小于0.05,模型显著相关。

3 心率增长、平曲线半径、海拔高度和车速关系模型

3.1 偏相关分析

考虑到高原公路驾驶人心率增长同时受到海拔、平曲线半径、行车速度3因素影响,分别控制其中2个因素,分析心率增长与另外一个变量之间的偏相关性,利用SPSS软件得到最终结果表4。由表4可知,在海拔3567~4709 m全区间内,海拔与驾驶人心率增长偏相关性最强相关系数分别为0.691和0.637,其次是平曲线半径相关系数为-0.494和-0.491,行车速度与心率增长偏相关性最弱,相关系数为-0.386和-0.318。

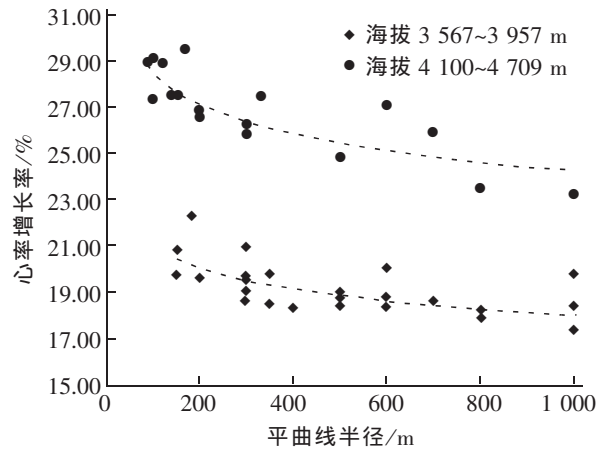


图2 海拔3567~4709 m 心率增长与平曲线半径关系
Fig.2 Relationship between heart rate growth and horizontal radius at altitude of 3567-4709 m

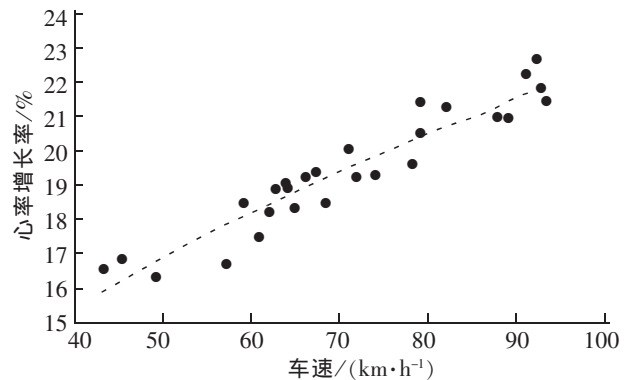


图3 心率增长与车速关系
Fig.3 Relationship between heart rate growth and speed

表4 心率增长率与各影响因素偏相关分析结果
Tab.4 Partial correlations between heart rate growth and other factors

	控制变量	分析变量	相关性	显著性(双侧)	自由度
海拔 3 567~3 957 m	车速 & 半径	心率增长率 & 海拔	0.691	0.008	27
	车速 & 海拔	心率增长率 & 半径	-0.494	0.000	27
	海拔 & 半径	心率增长率 & 车速	-0.386	0.000	27
海拔 4 100~4 709 m	车速 & 半径	心率增长率 & 海拔	0.637	0.005	19
	车速 & 海拔	心率增长率 & 半径	-0.491	0.000	19
	海拔 & 半径	心率增长率 & 车速	-0.318	0.000	19

3.2 模型建立

通过以上对心率增长率 N 、平曲线半径 R 、海拔高度 M 和车速 V 之间定性的分析及文献的研究成果^[12-13], 在海拔为 3 567~3 957 m 和 4 100~4 709 m 各自区间内 $R-N$ 之间呈负幂函数关系变化, 而 $V-N$ 和 $M-N$ 呈正幂函数关系变化, 考虑到易于转化成线性回归分析并尽量符合客观实际, 假设四参数之间的关系模型为:

$$N = b_0 \frac{V^{b_1}}{R^{b_2}} M^{b_3} \quad (6)$$

式中: N 为心率增长率, %; V 为行车速度, $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$; R 为平曲线半径, m; M 为海拔高度, m; b_0, b_1, b_2, b_3 为待定系数。

将式(6)两侧取对数得到三元线性方程, 通过统计软件 SPSS 中多元线性回归的方法得到分区间的四参数的回归模型式(7)~(8), 模型检验结果见表 5~6:

$$N = 2.575 \times 10^{-5} \frac{V^{-0.174}}{R^{0.002}} M^{1.177} \quad M \in (3\ 567, 3\ 957) \quad (7)$$

$$N = 0.0382 \frac{V^{0.012}}{R^{0.052}} M^{0.284} \quad M \in (4\ 100, 4\ 709) \quad (8)$$

由表 5~表 6 得到多元回归模型相关系数分别为 0.666 和 0.689, 且 T 检验各变量显著性水平 P 值均小于 0.05, 模型显著相关。

图 4~图 5 为模型式(7)、式(8)的回归标准化残差直方图。图 4~图 5 反映样本观测值服从正态分布, 证实了模型的正态性假设。

3.3 心率变化分界点确定

根据研究成果表明^[8], 驾驶人舒适、紧张及恐惧等 3 种心理状态下对应的心率增长率分别为 18%、27% 和 39%。首先该研究成果准确性目前仍存在争议, 而且在高原环境下, 驾驶人各项生心理负荷加重, 生心理阈值受环境因素影响与平原时不同; 根据规范中对平曲线半径最小值的取值, 在设计车速 $60 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 时, 平

表5 回归的相关系数
Tab.5 Regression correlation coefficient

模型	R	R 方	调整 R 方	标准估计的误差
海拔 3 567~3 957 m	0.839a	0.704	0.666	0.066 737 4
海拔 4 100~4 709 m	0.861	0.741	0.689	0.042 884 5

表6 多元回归模型参数
Tab.6 Multiple regression model parameters

模型		系数	标准误差	标准化系数	T 检验值	显著性
海拔 3 567~3 957 m	b_0	2.575E-5	1.231E-5	—	3.978	0.013
	b_1	0.174	-0.111	0.143	3.688	0.000
	b_2	0.002	0.013	-0.123	2.988	0.000
	b_3	1.177	0.319	1.036	4.879	0.002
海拔 4 100~4 709 m	b_0	0.038 2	-0.044	—	2.799	0.003
	b_1	-0.012	0.003	-0.212	-3.658	0.000
	b_2	0.052	0.039	0.039	3.809	0.000
	b_3	0.284	0.146	0.189	5.332	0.000

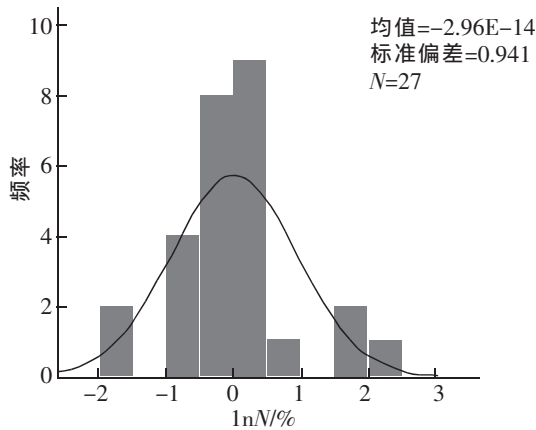


图4 标准化残差直方图(模型7)

Fig.4 Standardized residual histogram(model 7)

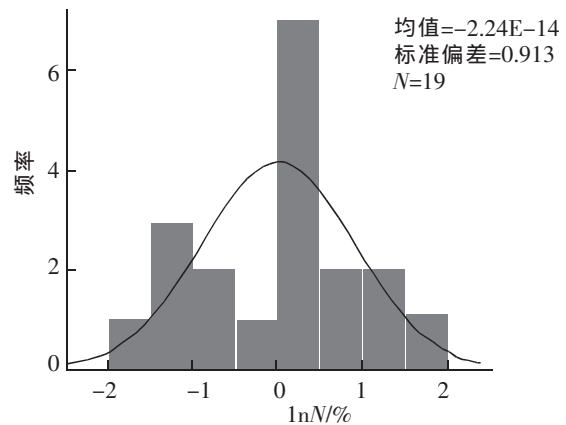


图5 标准化残差直方图(模型8)

Fig.5 Standardized residual histogram(model 8)

曲线半径极限值为 125 m。现取 $V=60 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}, M=3\ 957 \text{ m}, V=60 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}, M=4\ 709 \text{ m}$ 分别代入式(7)和式(8), 得到 $N-R$ 双因素关系式(9)~(10)

$$N=0.208R^{-0.002} \quad V=60 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}, M=3\ 957 \text{ m} \quad (9)$$

$$N=0.444R^{-0.052} \quad V=60 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}, M=4\ 709 \text{ m} \quad (10)$$

将半径 R 以 50 m 为间隔, 范围[50, 1 000], 代入上式并绘制成图 6。

通过计算 $N-R$ 关系图中曲线随半径变化曲率最大值点, 即可获得心率变化分界点, 对应的心率变化率和平曲线半径分别为 N' 和 R' 。各路段在对应 R' 前后驾驶人 心率增长率变化程度不同, 当 $R < R'$ 时, 随平曲线半径减小, 心率增长率显著增大; 当 $R > R'$ 时, 随平曲线半径增大, 心率增长率缓慢减小。因此宜将平曲线半径控制在大于 R' 以保证行车安全。

计算结果说明, 设计车速为 $60 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 时, 在海拔 3 567~3 957 m 内, $R'=300 \text{ m}$, 对应 $N'=20.75\%$; 在海拔 4 100~4 709 m 内, $R'=350 \text{ m}$, 对应 $N'=26.77\%$ 。

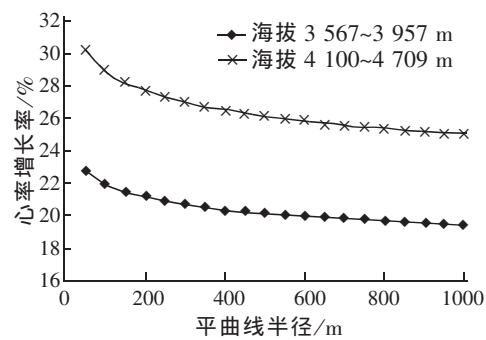


图6 海拔 3 567~3 957 m 和 4 100~4 709 m 心率增长率与平曲线半径的关系

Fig.6 Relationship between heart rate growth and horizontal radius at the altitude of 3 567 m~3 957 m and 4 100 m~4 709 m

4 总结

1) 本研究通过高原地区实地实车试验,综合考虑海拔、平曲线半径和车速对驾驶人速率增长的影响,最终得到的结果更全面,也更符合实际情况。在试验数据分析过程中,由于存在海拔分界点,将海拔高度分为3 567~3 957 m和4 100~4 709 m两个区间分别进行分析,符合生理学上对高原缺氧环境的分层定义。

2) 通过计算 $N-R$ 曲线最大曲率值获得心率变化分界点,从而得到对应平曲线半径值。在海拔3 567~3 957 m内,平曲线半径不宜小于300 m;海拔4 100~4 709 m内,平曲线半径不宜小于350 m,以保证行车安全。

3) 由于试验数据来源于海拔3 567~4 709 m路段,得到的模型若要进行其他海拔区间的延伸,需要进一步进行试验与研究。

参考文献:

- [1] 艾力·斯木吐拉,李鑫,伊力扎提·艾力.高原公路驾驶员生理心理特性现场测试研究[J].中国安全科学学报,2015(12):16-21.
- [2] 中交第一公路勘察设计研究院,JTG D20-2006,公路路线设计规范[S].北京:人民交通出版社,2006.
- [3] 吕永达.高原医学与生理学[M].天津:天津科技翻译出版公司,1995:1-4.
- [4] 乔建刚,温影影,周荣贵.基于驾驶行为的高原区公路纵坡折减[J].公路交通科技,2012,29(1):128-133.
- [5] 夏可,艾力·斯木吐拉.驾驶员心率变化与高原公路平曲线关系的试验研究[J].中国安全科学学报,2014,24(11):36-41.
- [6] 刘洋,艾力·斯木吐拉,方靖.高原公路纵坡路段驾驶员心率变化特性分析[J].中国安全科学学报,2014(12):3-8.
- [7] 李岩岩,艾力·斯木吐拉.高原公路线形组合路段驾驶员心率变化特性试验分析[J].中国安全科学学报,2015,25(6):3-7.
- [8] 乔建刚.基于驾驶员因素的山区双车道公路关键参数研究[D].北京:北京工业大学,2006:63-65.
- [9] FALKMER T,GREGERSEN N P. A comparison of eye movement behavior of inexperienced and experienced drivers in real traffic environments[J]. Optometry & Vision Science Official Publication of the American Academy of Optometry,2005,82(8):732-739.
- [10] 曹志远.基于驾驶信息负荷的特殊路段事故致因机理研究[D].上海:同济大学,2012:78-80.
- [11] 潘晓东.人体信息技术在道路交通环境与安全性评价中的应用[J].中国公路学报,2001,14(S1):109-111.
- [12] 潘晓东,殷艳红.基于人机工程学山区公路平曲线安全视距研究[J].华东交通大学学报,2007,24(2):55-57.

Experimental Research on Horizontal Curves of Plateau Highway Based on Heart Rate Change Index

Zhu Lingjie¹, Liu Benmin¹, Guo Zhongyin¹, Liu Jianbei²

(1.School of Transportation Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2.CCCC First Highway Consultants Co., Ltd., Xi'an 710075, China)

Abstract: In order to improve traffic safety on plateau highway, by using dynamic GPS, multi-channels cardiac electrophysiological polygraph and other testing equipments, road alignment, driving speed and drivers' psychological and physiological reactions are tested on Qinghai-Tibet Highway of No.109 National Highway with the altitude ranging from 3 567~4 709 m. Taking increased rate of heart rate as the evaluation index and altitude, horizontal radius and driving speed as influencing factors, this study established and tested models of heart rate change applied to the altitude of 3 567~3 957 m and 4 100~4 709 m with the method of multiple regression analysis. Finally, according to *Design Specification for Highway Route* (JTG D20-2006), the minimal reference value of horizontal radius at different altitude intervals was explored. The results indicate that the accuracy of models is favorable, and the models can reflect changes of heart rate growth. The value of horizontal radius with the altitude ranging from 3 567~3 957 m should not be less than 300 m, and with the altitude ranging from 4 100 to 4 709 m it should not be less than 350 m.

Key words: traffic safety; plateau highway; horizontal curve section; heart rate growth; multiple regression analysis

(责任编辑 王建华)